

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14939

研究課題名（和文）知識情報の獲得・更新に基づくリスク推定と予見的安全制御を実現する運転支援システム

研究課題名（英文）Driving assistance system that realizes anticipatory safety control based on the acquisition of knowledge information for hazard prediction

研究代表者

齊藤 裕一（Saito, Yuchi）

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：90770470

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、不確実環境下での運転知能の高度化を目的とし、走行環境の文脈とドライバ行動の状態に基づく潜在危険度の予測を内蔵した予見的運転支援技術の基盤研究を実施した。人間にとって事故回避が困難である場面でのヒヤリ事象をドライブレコーダDBから抽出し、そのニアミス事象での安全マージンの指標を定量化することによって、受け入れ可能な結果とそうでない結果にデータを分類することに成功し、受け入れ可能な結果のみを学習することで、過去のヒヤリ経験のデータから駆動する推奨速度AIモデルを新規に開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「次に何が起こりうるか」に係る危険予測AIの実現に向けた大きな壁は、「何のデータに学ぶか」である。熟練ドライバは、視覚情報だけでなく、想定事象の知識や過去の経験に基づいて意思決定を実行するが、あらゆる運転データを集めることはデータの収集コストが高い。これに対して、本研究では、18年間に渡って経験豊富なタクシーのヒヤリハットデータを収集しているドライブレコーダDBの活用と機械学習を駆使して、従来モデル駆動で実現できなかった「先読み運転」をデータ駆動AIで挑戦したことに学術的意義があり、交通事故のさらなる削減に寄与しうる技術を開発した点で社会的にも意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research project conducted a fundamental study of anticipatory driving support technology with built-in prediction of latent risk based on the context information of the driving environment and the driver behavior status, with the goal of enhancing driving intelligence pertaining to the hazard anticipatory driving in an uncertain environment. We extracted near-miss events from a drive recorder database in situations where accident avoidance is hard for humans to avoid, and successfully classified the data into acceptable and unacceptable outcomes by quantifying the safety margin indices in the near-miss events. This study developed a novel recommended speed AI model driven by data from previous near-miss experiences by learning only acceptable outcomes.

研究分野：ヒューマンマシンシステム

キーワード：安全 危険予測 データ駆動 運転支援 人間機械系 ヒューマンインタフェース

1. 研究開始当初の背景

交通死亡事故のうち高齢者が占める割合が増加し、高齢者が関与する事故の削減が期待される。加齢に伴う高齢者の認知・判断・操作機能の遅れを補完し、事故の未然防止を図るだけでなく、運転不安の緩和を通じた移動の自由の確保は喫緊の課題である。特に、歩行者事故は、環境文脈、人的、また車両要因の交錯の結果であり、発生頻度が稀である一方で、重篤な被害を生む可能性が高い。機械が障害物を検知し、人の行動をモニタリングしながら、危険が迫った際に危機回避を図る既存技術にみられるように、機械の決定に基づき「人から機械へ指揮権を移す安全制御」を行う仕組みは欠かせない。しかしながら、「運転者主体の原則」のもと、極めて緊急性の高い状況に限定して危機回避の制御を実行する従来支援装置では、たとえば、「死角からの歩行者の急な飛び出し」に対する危機回避能力に限界がある。

研究代表者は、熟練運転者の「防衛運転モデル」を内蔵した運転支援系を構築し、高齢者の運転を積極的に補う先読み運転支援システムを開発してきた。既往研究では、危険度が顕在化する以前に、数秒先に起きうる「危険事象のワーストケース」の定義から算出可能な適正速度に減速することを通じて、万が一の際に人と機械の機能に対応可能な時間余裕を確保することを提案した。しかし、市街路環境は高い不確実性を有し、人が現実に飛び出す頻度は極めて稀であることから、極めて稀である事象に対する安全第一策は、運転者の多様な動機の観点を踏まえ、社会的に受け入れ不可能である。すなわち「走行環境文脈に応じた潜在危険度を如何に推定し、リスク回避と受容性の確保は如何に両立しうるか」という課題が解決されていない。

さらに、現状の自動運転技術は、通常走行に対応する先行車追従ならびに車線維持制御の高度化を基盤に縦・横方向制御の自動化を図る。しかし、死亡事故が多い市街路（高不確実性）での安全確保の観点では、人の行為を機械に置き換える「自動化技術の高度化」ではなく、「リスクを先読みする運転知能の高度化」が肝である。すなわち人機能の優れた特性を活かしつつも、限りある人機能を補完することにより、人を含めたシステムの安全性ならびに信頼性向上を目指す必要がある。

2. 研究の目的

本研究課題は、不確実性環境下での危険予測に係る運転知能の高度化を目的とし、走行環境の文脈とドライバ行動の状態に基づく潜在危険度の推定を内蔵した予見的運転支援技術の基盤研究を実施する。具体的には、ニアミス大規模データベースを活用した危険予測知識の獲得によって、走行環境の文脈特徴から予測される潜在危険度を推定する学習モデルの基盤を確立し、それを物理空間でリアルタイム文脈センシングが可能な運転支援系に内蔵し（潜在危険度情報を触覚情報に変換し）、人と機械の協調制御を実現する。本研究課題は、知識情報の特徴量化を通じた危険度の自動識別ならびに知識情報の更新に基づく Cyber-Physical システムによって運転知能の高度化を試み、不確実性環境下で必要なときに必要なだけシステムが介入するヒューマンマシンシステム高安全性を実現するための設計指針を得ようとするものである。

3. 研究の方法

(1) 走行環境の文脈とドライバ行動の状態に基づく潜在危険度推定技術の構築

14 万件超のニアミス事象に関する知識情報を含むデータベースを活用し、市街地の走行環境文脈から起こりうる事象の確率を予測する危険度推定モデルを提案する。

(1-1) 走行環境文脈の理解技術：機械学習ベースのデータ分析手法を駆使し、歩行者、またサイクリストの不安全行動・意図的な逸脱を誘発しやすい環境文脈の特徴を知識情報として定量化し、文脈要因とリスクの因果関係を解析する。

(1-2) 通常からの逸脱を検知する技術：潜在危険度の上昇は、走行環境の文脈と運転者の意図・行動の間のミスマッチの結果である。不確実性環境下での慎重な運転態度、または積極的（攻撃的）な運転態度を検知する技術を構築する。

(1-3) ニアミス事象の形成過程の実態把握：対歩行者、対自転車、また対車両のもとでのニアミス知識データに基づく機械学習モデルを構築し、対象・形態特有の特徴（特徴量の寄与率）を定量化し、さらなる事前知識の獲得・進化を図る。

(1-4) 危険度推定に基づく走行速度の適正化技術：社会・ドライバ受容性を確保するうえで潜在危険度と適正速度の間の調停を図る技術を開発する。

(1-5) 仮想空間での危険予測モデルの評価：多様な走行環境文脈を構築可能なシミュレーションを構築し、市街地の文脈から起こりうる事故リスクの予測とそれに基づく安全制御の実現可能性とその有効性を立証する。

(2) 潜在危険度に応じたアダプティブシェアードコントロールの設計と評価

リスク情報から触覚情報への変換に基づく制御権限共有型の人間機械系を構築し、危険度に応

じて人と機械の協調状態における主体を移行する方式を新規に提案する。

(2-1) 反力制御系の構築：ステアリング、またペダルに付加反力を与える機構を設計し、走行環境文脈の理解技術、ならびに通常からの逸脱検知技術に基づき人と機械の協調状態における主体を動的に変えるシェアードコントロールを開発する。

(2-2) 人を含む系での認知工学的評価：シミュレータ、または車両を用いて、潜在危険度と適正速度の間の調停を図る技術の有効性・受容性の評価検証を実施する。

4. 研究成果

(1) 走行環境の文脈とドライバ行動の状態に基づく潜在危険度推定技術の構築

14 万件超のニアミス事象を含むドライブレコーダ DB を用いて、状況特徴づける情報に応じて車両固有の推奨速度を算出するデータ駆動危険予測 AI のドライバモデルを新規に開発した。この課題の大きな成果は、これらの検討を通じて、膨大なデータからその状況特徴づける情報の抽出法と学習のためのデータ選別法を発見したことである。具体的な成果は、つぎに記す。

(1-1) 走行環境文脈の理解技術

本課題では、歩行者／自転車の飛び出し等、人間ドライバ（あるいは自動運転システム）にとって事故回避が困難である場面（エッジケース）として死角を含む無信号交差点、駐車車両追い越し、また停止車両脇通過のシナリオでのニアミス事象のデータを DB から抽出した。14 万件超のニアミス事象を含むドライブレコーダ DB から、本研究で対象とする潜在危険（死角）が関与するデータの全てを抽出できたことに加え、それらのデータの全てにその状況特徴づける走行環境の情報の集合、すなわち文脈情報のアノテーションの付与を完了できたことは、最初の成果の一つである。つぎに、そのエッジケースの下での安全マージンの指標を定量化することによって、(i) ドライバにとって受け入れ可能な結果と (ii) そうでない結果に分類することに成功した。受け入れ可能な結果であったデータのみを学習することで、過去のヒヤリ経験のデータから駆動できる推奨速度モデルを新規に開発した。また構築されたデータ駆動危険予測モデルに用いられた説明変数から、モデルの目的変数である推奨速度の生成に寄与しうる走行環境の文脈情報を特定できたことも成果である。ヒヤリ経験のデータ駆動に基づいて推奨速度を算出する方法論に関わる成果は、Accident Analysis and Prevention (IF = 4.99) に掲載された。

(1-2) 通常からの逸脱を検知する技術

なぜ、物事が失敗するのかを科学することも重要であるが、物事がうまくいく現象論を解明することも重要である。本課題では、不確実環境において推奨速度を推定するモデルと危険速度を推定するモデルを構築し、両者のモデルの差異を明らかにすることから研究をはじめた。本課題では、(1-1)の推奨速度モデルに加えて、ドライバにとって受け入れ「不可能」な結果であったデータのみを学習することで、過去のヒヤリ経験のデータから駆動できる「危険速度モデル」を新規に開発し、モデルの目的変数である推奨速度ならびに危険速度の生成に寄与しうる走行環境の文脈情報を特定することに成功した。そのモデル構築の検討結果から通常からの逸脱を検知する技術を構築した。

(1-3) ニアミス事象の形成過程の実態把握

安全マージンがどのように算出できるかは、古くからの研究の問いである。本研究課題では、車両の停止距離アルゴリズムを用いて、事故回避の上でドライバに許された余裕時間（セイフティクッションタイム）を独自に提案し、各シナリオのもとでの余裕時間（セイフティクッションタイム）の分布から、ニアミス事象の形成過程の実態把握を調査し、対自転車と対歩行者の間では、ニアミス形成時における安全マージン（余裕時間）の分布に有意な差があることを特定した。

(1-4) 危険度推定に基づく走行速度の適正化技術

ヒヤリ経験のデータから駆動する危険予測（推奨速度）モデルの開発は、「何のデータに学ぶか」を科学することと同様である。推奨速度と危険速度を推定するモデルの構築の上で、安全マージン指標の中央値を基準に、(i) ドライバにとって受け入れ可能な結果と (ii) そうでない結果に分類した。しかし、この課題では、中央値を基準に分類するのではなく、安全マージンを用いて危機回避に許された時間が切迫した方向から比較的余裕度の大きい方向に向けて学習するデータを選別していき、学習するデータの安全水準が車両安全に与える効果を明らかにした。

(1-5) 仮想空間での危険予測モデルの評価

本課題では、「受け入れ可能な結果」であったデータのみを学習することで、過去のヒヤリ経験のデータから駆動できる推奨速度モデルを用いて、「受け入れ不可能な結果」であったデータに適用し、「受け入れ不可能な結果」のもとで推奨速度に誘導できたと想定した際の安全マージン指標を算出することで、車両安全に与える効果を可視化した。その結果、「受け入れ不可能な結果」の半数以上で、「受け入れ可能な結果」に誘導できることを明らかにした。

(2) 潜在危険度に応じたアダプティブシェアードコントロールの設計と評価

本課題では、構築したデータ駆動運転知能システム（機械学習モデル）を使用し、ドライバを推奨走行軌跡に触覚的に誘導する触覚的シェアードコントロールを開発した。触覚的フィードバックの創り込みが可能な操作端末を備えたドライビングシミュレータの整備計画において、Forum 8 社製の VR 環境（UC-win/road ソフトウェア）に車両運動シミュレーション（CarMaker）を連携させる Matlab/Simulink 開発環境を整備した。なお、この開発環境の整備においては、科研費・若手に加えて、立石科学技術財団・研究助成「データ駆動型運転知能と触覚的シェアードコントロールの融合に基づく人と機械の協調」の支援を受けていることをここに記載する。

(2-1) 反力制御系の構築

ステアリングに付加反力を与える機構を設計し、走行環境文脈の理解技術、ならびに通常からの逸脱検知技術に基づき人と機械の協調状態における主体を動的に変えるシェアードコントロールのコンセプトを開発した。はじめに、死角を含む無信号交差点を対象に、ドライバ行動の視点ではなく、歩行者／自転車の行動に視点を移した。横断してくる対象が自動車への衝突を回避するうえでの安全マージン（研究代表者が独自に提案しているセーフティクッションタイムを使用）を新規に算出することで、交差点での自車の走行横位置によってどの程度の予防安全性が向上するかについての検討を実施した。これらの検討を通じて、ヒヤリ経験のデータから駆動する推奨車両軌跡の算出方法を新規に提案し、推奨車両軌跡に触覚的に誘導できるシェアードコントロールを開発した。

(2-2) 人を含む系での認知工学的評価

交通環境下での AI の決定に対する人間ドライバの受容、信頼、行動変容のメカニズムは明らかでない。本研究では、FORUM8 社の VR 環境に、データベースに記録された走行環境を緻密に再現することに成功し、(i) 状況認識の評価手法の一つである SAGAT を用いて、ハザードの予測能力を測るテスト手法、また (ii) ドライバの主観的安全マージンを測るテスト手法を新規に開発した。本研究では、人間ドライバにとって事故回避が困難であるエッジケースを対象に、ハザードの予測と主観的安全マージンの見積りに係るスキルが走行速度の決定に与える影響をシミュレータ実験から検証した。この成果は、自動車技術会関東支部学術講演会におけるベストペーパー賞の受賞に見られるように高く評価されている。この走行環境文脈に対するドライバの認知のメカニズムに関する成果を基盤に、今後、ドライバは AI の判断（推奨速度）をどのように受け止めるか、また推奨車両軌跡をどのように受容するかについてのさらなる検討を進めたい。つぎに、推奨速度 AI モデルが出力する値を可視化し、ドライバに提示するためのインタフェースのプロトタイプを構築した。FORUM8 社の VR 環境に、ドライブレコーダデータベースに記録された走行環境を緻密に再現し、たとえば、死角を含む無信号交差点等に接近する際に推奨速度を視覚的に提示する、あるいは聴覚的に音声で支援する方法を整備した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Saito Yuichi, Kochi Fuma, Itoh Makoto, Fushima Takesato, Sugano Takashi, Yamamoto Yasunori	4. 巻 -
2. 論文標題 Influence of road environmental elements on pedestrian and cyclist road crossing behaviour	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/18824889.2021.1894900	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Saito Yuichi, Yoshimi Ryoma, Kume Shinichi, Imai Masahiro, Yamasaki Akito, Ito Takuma, Inoue Shintaro, Shimizu Tsukasa, Nagai Masao, Inoue Hideo, Raksincharoensak Pongsathorn	4. 巻 77
2. 論文標題 Effects of a driver assistance system with foresighted deceleration control on the driving performance of elderly and younger drivers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour	6. 最初と最後の頁 221~235
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.trf.2020.12.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuichi Saito, Fumio Sugaya, Shintaro Inoue, Pongsathorn Raksincharoensak, Hideo Inoue	4. 巻 163
2. 論文標題 A Context-Aware Driver Model for Determining Recommended Speed in Blind Intersection Situations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Accident Analysis and Prevention	6. 最初と最後の頁 106447
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aap.2021.106447	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takuma Ito, Ryosuke Matsumi, Yuichi Saito, Akito Yamasaki, Shintaro Inoue, Tsukasa Shimizu, Masao Nagai, Hideo Inoue, Minoru Kamata	4. 巻 -
2. 論文標題 Comparison of Proactive Braking Intervention System Acceptability via Field Operation Tests in Different Regions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Intelligent Transportation Systems Research	6. 最初と最後の頁 1~26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s13177-021-00278-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 菅野 崇, 黒田 康秀, 伏間 丈悟, 山本 康典, 齊藤 裕一	4. 巻 38
2. 論文標題 走行環境の特徴を利用した危険予測技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 マツダ技法	6. 最初と最後の頁 98 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34338/mazdagihou.38.0_98	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuichi Saito, Ryoma Yoshimi, Shinichi Kume, Xun Shen, Akito Yamasaki, Ryosuke Matsumi, Takuma Ito, Toshiki Kinoshita, Shintaro Inoue, Tsukasa Shimizu, Masao Nagai, Hideo Inoue, Pongsathorn Raksincharoensak	4. 巻 early access
2. 論文標題 Effectiveness of a Driver Assistance System With Deceleration Control and Brake Hold Functions in Stop Sign Intersection Scenarios	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	6. 最初と最後の頁 1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TITS.2021.3085847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Fuma Kochi, Yuichi Saito, Makoto Itoh, Takesato Fushima, Takashi Sugano, and Yasunori Yamamoto
2. 発表標題 Modeling and Prediction of Pedestrians' and Cyclists' Road Crossing Behavior Using Near-Miss Incident Data
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideo Inoue, Mohanad El-Haji, Thomas Freudenmann, Haipeng Zhang, Pongsathorn Raksincharoensak, and Yuichi Saito
2. 発表標題 Validation Methodology to Establish Safe Autonomous Driving Algorithms with a High Driver Acceptance Using a Virtual Environment
3. 学会等名 5th International Symposium on Future Active Safety Technology towards Zero-Traffic Accident (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久米伸一, 齊藤裕一, 井上秀雄, ボンサトーン・ラクシンチャラーンサク
2. 発表標題 セイフティクッション: 走行環境文脈と運転行動状態に基づく危険度推定モデルの構築 (第二報)
3. 学会等名 2019年度自動車技術会春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高地鳳真, 齊藤裕一, 伊藤誠, 伏間丈悟, 菅野崇, 山本康典
2. 発表標題 死角を含む走行環境文脈における歩行者・自転車の行動に関するデータ解析
3. 学会等名 SICE 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤裕一
2. 発表標題 セイフティクッション: 走行環境の文脈とドライバの運転状態に基づく潜在危険度の推定
3. 学会等名 自動車技術会ヒューマンファクター部門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichi Saito, Hussam Muslim, Makoto Itoh
2. 発表標題 Design of Haptic Protection with an Adaptive Level of Authority Based on Risk Indicators under Hands-on Partial Driving Automation
3. 学会等名 Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusaku Ichinose, Huiping Zhou, Yuichi Saito, Makoto Itoh
2. 発表標題 To Explore Driver's Behavioral Adaptations in Providing Information about Minimal Risk Maneuver Under Conditional Driving Automation
3. 学会等名 Proceedings of the 6th International Symposium on Future Active Safety Technology towards Zero-Traffic Accident (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichi Saito, Ryoma Yoshimi, Kume Shinichi, Xun Shen, Akito Yamasaki, Ryosuke Matsumi, Takuma Ito, Toshiki Kinoshita, Shintaro Inoue, Tsukasa Shimizu, Masao Nagai, Hideo Inoue, Pongsathorn Raksincharoensak
2. 発表標題 Driver Assistance System With a Foresighted Deceleration Control Function in Non-Signalized Intersection Scenarios
3. 学会等名 Proceedings of the 6th International Symposium on Future Active Safety Technology towards Zero-Traffic Accident (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichi Saito, Fumio Sugaya, Shintaro Inoue, Pongsathorn Raksincharoensak, Hideo Inoue
2. 発表標題 Context-Sensitive Driver Model for Determining Recommended Speed in Intersection Driving Scenarios
3. 学会等名 Proceedings of the 6th International Symposium on Future Active Safety Technology towards Zero-Traffic Accident (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤裕一, 菅谷文男, 井上慎太郎, ポンサトーン・ラクシンチャラーンサク, 井上秀雄
2. 発表標題 見通しの悪い交差点における推奨速度を決定するコンテキストウェアドライバモデルの提案
3. 学会等名 2021年度自動車技術会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高地鳳真, 齊藤裕一, 伊藤誠, 内田信行
2. 発表標題 運転者のハザード予測とリスク認知のスキルが無信号交差点通過時の速度決定に与える影響
3. 学会等名 自動車技術会関東支部学術研究講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齊藤裕一
2. 発表標題 見通しの悪い交差点における推奨速度を決定するコンテキストウェアドライバモデルの提案
3. 学会等名 ライブレコーダデータ活用研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤裕一
2. 発表標題 見通しの悪い交差点における推奨速度を決定するコンテキストウェアドライバモデルの提案
3. 学会等名 自動車技術会アクティブセイフティ部門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------